



VÝROBA 3D MATERIÁLŮ POMOCÍ ELEKTROSTATICKEHO ZVLÁKŇOVÁNÍ A METODY RAPID PROTOTYPING.

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil
Studijní obor: 3106R004 – Netkané textilie
Autor práce: **Tomáš Kyselák**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.





PRODUCTION OF 3D MATERIAL BY COMBINATION OF ELECTROSPINNING METHOD AND RAPID PROTOTYPING.

Bachelor thesis

Study programme: B3107 – Textil
Study branch: 3106R004 – Nonwovens and nanofibers
Author: **Tomáš Kyselák**
Supervisor: Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.



Tento list nahradte
originálem zadání.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práci Ing. Jiřímu Chvojkovi Ph.D za jeho snahu, trpělivost a cenné rady při vypracování této práce. Poděkování patří také Ing. Jiřímu Šafkovi Ph.D za odborné vedení při práci s 3D tiskárnou. Dále Ing. Lukáši Voleskému a Ing. Zuzaně Andršové z katedry materiálů za pokusy na vzorcích.

Anotace

Tato práce se zabývá navrhnutím struktur budoucích tkáňových nosičů a jejich vytvořením kombinací nanovláken a 3D tisku. Tisknutí biodegradabilním materiálem MED 610. Poté přichází jejich analýza rozměrů a zkoumání mechanických vlastností. Pozorovací analýza odhalila velké rozdíly mezi kompletně natisknutým materiálem a vzorky bez pěti základních vrstev, kde se objevily nanovlákná na povrchu kompozitu.

Klíčová slova: biodegradabilní materiál, 3D tisk, elektrostatické zvlákňování, Rapid prototyping, nanovlákná, tkáňový nosič, MED 610

Annotation

This bachelo's thesis applies with the suggest of structure of future tissues carrier and their creation using nanofibre and 3D print. Print of biodegradable material MED 610. After that comming analysis of size this samples and research their mechanical properties. Analysis found big differences between completely printed material and between samples without five elementary layers, where has been found nanofibres on the top of composite.

Key words: biodegradable material, 3D print, electrospinning, Rapid prototyping, nanofibres, tissue carrier, MED 610

Seznam zkratk

CAD	(computer-aided design), počítačem podporované projektování
kV	kilovolt
MED 610	medicínský materiál 610
Mw	hmotnostně střední molární hmotnost
N	newton
PCL	polykaprolakton
R _e MPa	mez kluzu v tahu v megapacalech
R _m MPa	mez pevnosti v tahu v megapacalech
SEM	rastrovací elektronový mikroskop
STL	(Standard Triangulation Language), polygonová optimalizovaná síť a je zdrojovým formátem v oblasti 3D tisku
wt %	hmotnostní procento

OBSAH

1 Úvod	9
2 Teoretická část	10
2.1 Elektrostatické zvlákňování	10
2.2 Historie elektrostatického zvlákňování	11
2.3 Nanovláknna	11
2.4 Poly(ϵ -kaprolakton) (PCL)	12
2.5 Použité přístrojové zařízení	12
2.5.1 Zařízení Nanospider TM	13
2.5.2 Tiskárna Objet Connex 500	15
2.5.3 Optický mikroskop	17
2.5.4 Naprašovací/napařovací zařízení	17
2.5.5 Rastrovací elektronový mikroskop (SEM)	18
2.5.6 Mikroohybový přístroj	20
2.5.7 Zkouška tahem	21
3 Experimentální část	22
3.1 Příprava roztoku PCL	22
3.2 Výroba nanovláknenné vrstvy	22
3.3 Navržení struktury nosiče	23
3.4 Příprava pro 3D tiskárnu	24
3.5 Tisk zkušebních vzorků a vybrání finálních struktur	25
3.5.1 Příprava pro 3D tiskárnu finálních struktur	27
3.5.2 Tisk finálních struktur	27
3.6 Mechanické testování	31
3.6.1 Analýza optickým mikroskopem	31
3.6.2 Analýza rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM)	33
3.6.3 Mikroohybová zkouška	37
3.6.4 Zkouška tahem	37
4 Diskuze výsledků	39
5 Závěr	40
6 Použité zdroje	42
7 Zdroje obrázků	45
8 Obrázková příloha	46

1 Úvod

Výroba nanovláken v dnešní době je už běžnou záležitostí, a proto se vynalézají nové modifikace nanovlákených struktur nebo kompozitních materiálů. Už před devatenácti lety se začalo objevovat používání jiných materiálů s nanovlákennou strukturou, a poté docházelo k vytváření různých výrobních procesů nanovlákených kompozitů. Na Technické univerzitě v Liberci je možné otestovat a vytvořit nanokompozit z polymerů, který nenapadá ani nedráždí náš organismus. Sloučením dvou rozdílných materiálů, které by mohly mít lepší vlastnosti, zejména soudržnost a specifické mechanické znaky, než jak je známo u nanovlákených struktur.

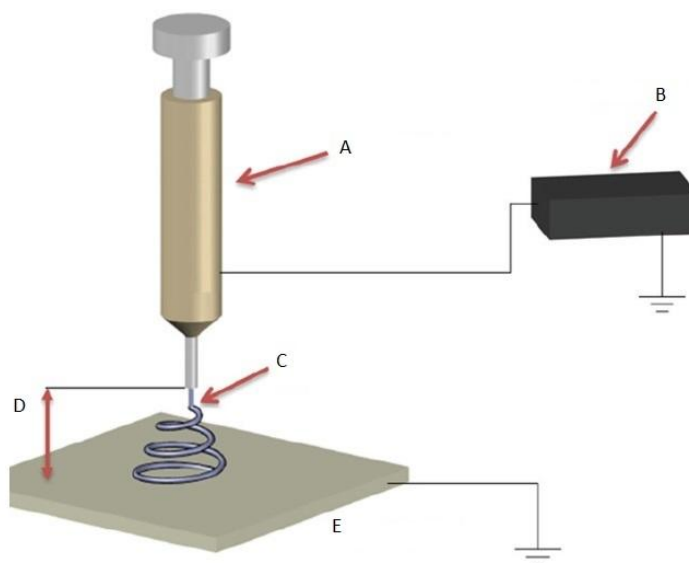
Cílem této práce je vytvoření trojrozměrných scaffoldů pomocí nanovlákenné vrstvy vyrobené z polykaprolaktonu, navrhnutí struktury s přesně danými rozměry a následné experimenty 3D tisku na podkladovou nanovlákennou strukturu. Dalším krokem je finální scaffoldy mechanicky testovat a mikroskopicky analyzovat.

2 Teoretická část

Tato část byla vypracována k technickému popisu použitých přístrojových zařízení. Teoretické poznatky byly využity ke zpracování této práce.

2.1 Elektrostatické zvlákňování

Způsob výroby vláken o průměru 50–1000 nanometrů nazýváme elektrostatické zvlákňování nebo také elektrické zvlákňování. K výrobě je potřeba použít polymerní roztok a elektrostatickou sílu. Podstata procesu elektrostatického zvlákňování se nachází ve využití vysokého napětí, kdy dochází k vytvoření elektricky nabitého polymerního roztoku. Polymerní roztok je zvlákňován pomocí trysky důsledkem působení elektrického pole mezi tryskou a kolektorem. Na povrchu polymerního roztoku se indukuje elektrický náboj. Jak intenzita elektrického pole vzrůstá, dochází k destabilizaci hladiny polymerního roztoku a k formování povrchu roztoku, až se vytvoří Taylorův kužel. Dalším zvýšením intenzity elektrického pole se překoná povrchové napětí a ze špičky Taylorova kužele tryská nabitý proud polymerního roztoku. Vlivem intenzivního dloužení polymerního proudu v prostoru mezi tryskou a kolektorem se odpaří až 90% rozpouštědla. Vznikají tak ultra jemná vlákna, která se ukládají na kolektor. Schéma elektrostatického zvlákňování na obr. 1.



Obr. 1: Schéma elektrostatického zvlákňování: 1) dávkovací stříkačka s roztokem polymeru, 2) zdroj vysokého napětí, 3) nabitý polymerní roztok, 4) vzdálenost mezi hrotem jehly a kolektorem, 5) uzemněný kolektor. (Evan, 2013).

2.2 Historie elektrostatického zvlákňování

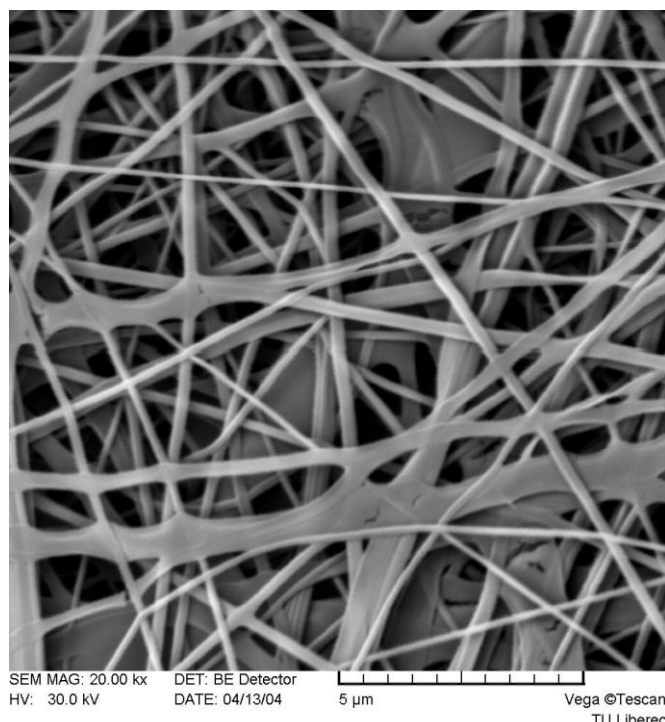
V letech 1934 až 1944 publikoval Formhals sérii patentů (Formhals, 1934), (Formhals, 1939), (Formhals, 1940), (Formhals, 1943), (Formhals, 1944), které se věnují experimentálním zařízením na výrobu vláken z polymerního roztoku acetátu celulózy za pomoci elektrostatické síly. Vonnegut a Neubauer (Vonnegut, 1952) v roce 1952 sestrojili přístroj pro elektrické rozprašování. Pomocí toho zařízení produkovali proudy kapiček o průměru přibližně 0,1 mm. elektricky nabitých kapiček. V roce 1955 se Drozin zabýval rozptylem kapalin do aerosolů pod vysokým napětím (Drozin, 1955). Používal stejný systém jako Vonnegut a Neubauer. Simons (Simons H., 1966) patentoval v roce 1966 zařízení na výrobu netkaných textilií pomocí elektrostatického zvlákňování. V polymerním roztoku byla vložena kladná elektroda a záporná byla napojena na kolektor. Baumgarten (Baumgarten, 1971) v roce 1971 vyráběl akrylová vlákna s průměry 0,05-1,1 mikrometrů. Zvlákňovaná polymerní kapka podávaná infuzním čerpadlem se nacházela na vrchu nerezocelové kapiláry. Bylo použito vysokého stejnosměrného napětí připojeného ke kapiláře. Snímání vláken bylo prováděno na kolektor. Poté Reneker a Chun (Reneker D. H., 1996) oživil zpracování široké škály polymerních roztoků a Larrondo a Manley (Larrondo, 1981) v oblasti polymerních tavenin (Růžicková, 2004).

V roce 2003 byla na Technické univerzitě v Liberci patentována technologie zvlákňování polymerního roztoku z volné hladiny a následně se vyvinula technologie Nanospider. Tato technologie dokáže vyrábět nanovlákna v průmyslovém měřítku. Za výzkumem a vývojem stojí tým profesora Jirsáka (Jirsák, 2003) z katedry netkaných textilií a nanovlákených materiálů.

2.3 Nanovlákna

Nanovlákna jsou délkové útvary o průměru menším než 500 nanometrů. Pro představu lidský vlas má průměr cca 80 mikrometrů a to je průměr zhruba 200krát větší než průměrné nanovlákno. Světelným optickým mikroskopem nanovlákna neuvidíme, protože průměr nanovlákna je menší než vlnová délka světla. Nanovlákna je možné pozorovat elektronovým mikroskopem, protože elektrony mají kratší vlnou délku než světlo. Tato ultra jemná vlákna mají velký specifický měrný povrch, dobrou prodyšnost s malými póry, ale nanovláknenná vrstva má objem pórů vysoký. Mechanické vlastnosti jsou na vysoké úrovni v poměru k hmotnosti samotných vláken.

Jejich vlastnosti se uplatňují v mnoha aplikacích; v kompozitních materiálech, filtrech, biomedicině, tkáňovém inženýrství, potravinářském průmyslu a také v membránách (Elmarco, 2014).



Obr. 2: Náhodně orientovaná nanovláknenná vrstva, zvětšení 5µm. Zdroj vlastní.

2.4 Poly(ϵ -kaprolakton)

Polykaprolakton (PCL) je syntetický polymer, cyklický ester, který patří do skupiny laktonů. Je to biomateriál, který má živočišný organismus schopnost biologicky odbourat. Degraduje se hydrolýzou esterových vazeb. Teplota tání tohoto polymeru je 60 °C a teplota skelného přechodu je – 60 °C (Hermanová, 2013).

2.5 Použité přístrojové zařízení

Nejdříve bylo použito zařízení NanospiderTM, na kterém byl polymer elektrostaticky zvlákněn. Poté za použití 3D tiskárny byla natištěna struktura na nanovláknennou vrstvu, kdy následně optickým mikroskopem byly vytvořeny snímky kompozitního materiálu. Naprašovacím/napařovacím zařízením byly vzorky pozlaceny a připraveny pro sledování elektronovým mikroskopem (SEM). Po vytvoření snímků byly vzorky testovány mikroohybovou zkouškou.

Působení tlaku na materiál a cyklického zatěžování se zaznamenávají mikroohyby vzorku. Pomocí trhačního zařízení byla zkoušena pevnost v tahu u jednotlivých vzorků.

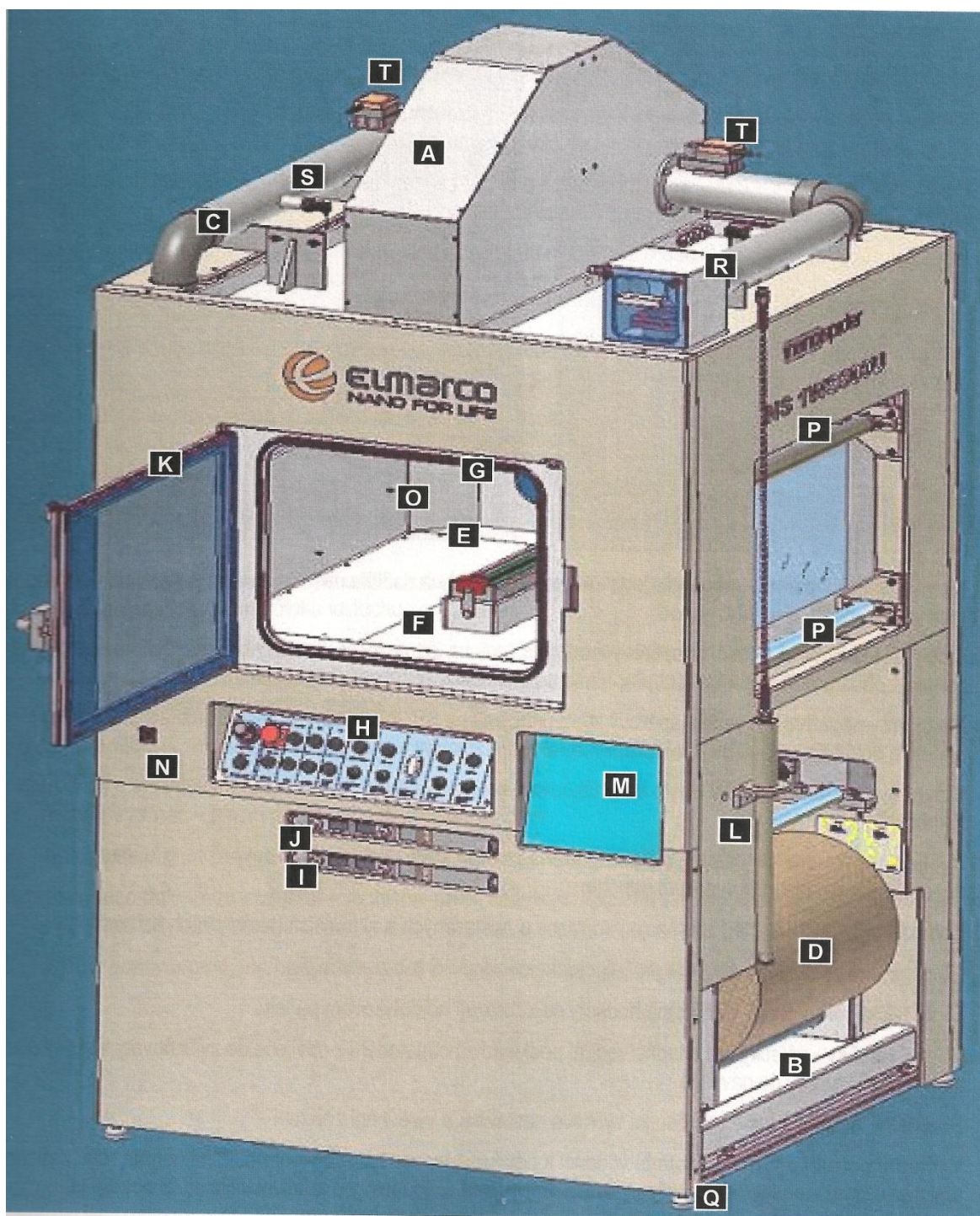
2.5.1 Zařízení Nanospider™

Nanospider™ není jen laboratorní verze, ale zařízení připravené pro malosériovou výrobu. Pomocí zařízení je možné vytvářet organická i anorganická nanovlákná. Technologie Nanospider™ pracuje na bázi zvlákňováním polymeru za pomoci elektrospiningu (Elmarco, 2004–2013).

Zařízení s názvem NS Productions Lines 500 (NS 1WS500U) má dostačující kapacitu pro maloobjemovou výrobu, současně je také nejmenší produkční zařízení a jeho použití vyhovuje laboratornímu výzkumu.

Zařízení pochází od firmy Elmarco, která je první firmou na světě ve výrobě a prodeji zařízení pro výrobu nanovláknenného materiálu v průmyslu. Linka NS 1WS500U umožňuje výměnu elektrodového systému a je možné si zvolit ze tří typů zvlákňovacích elektrod; strunové statické, strunové rotační a válcové rotační elektrody. Provádí tím proces pro vodou nerozpustné a rozpustné polymery. Integrované odvíjení a navíjení ovládá posun podkladového materiálu. Zařízení pojme roli materiálu o maximálním průměru 400 mm a maximální šíři 500 mm. Rychlost podkladového materiálu se pohybuje v rozmezí 0,015–1,95 m/min. Ke zvýšení produkce stroje může být volitelně přikoupeno periferní odvíjecí a navíjecí zařízení. Monitoring procesu obstarává systém, který sleduje procesy v čase a zobrazuje je na dotykovém LCD displeji. K zařízení je možné připojit počítač a přenést do něj data k analýze (Elmarco, 2004–2013).

V zařízení NS 1WS500U se nachází jedna zvlákňovací elektroda a její délka je 500 mm. Vyrábí se 200–500 mm široká nanovláknenná vrstva a průtok vzduchu činí 20–150 m³/h. Nastavení výšky kolektoru je v rozmezí 130–280 mm. Doba provozu na jednu dávku polymeru je přibližně 60 minut, ale závisí na použitém typu polymeru.



Obr. 3: Schéma NanospiderTM: A) výstupní komín s ventilátorem odvodu, B) odvíječ/navíječ, C) vstupní potrubí, D) podkladový materiál, E) zvláknovací komora, F) modul s rotační zvláknovací elektrodou, G) sběrná elektroda, H) hlavní ovládací panel, I/J) zdroj vysokého napětí pozitivní/negativní, K) hlavní dveře, L) vybíjecí tyč, M) zobrazovač, N) ethernetová zásuvka, O) čidla teploty vlhkosti, P) vodící válečky, Q) stavitelné nohy, R) výstupní potrubí s filtrem, S) čidlo průtoku. (Elmarco, OM).

Technologie je patentovaná k zvlákňování z volné hladiny roztoku polymeru v silném elektrostatickém poli bez použití trysek. U této technologie není nutné zvlákňovat z kapky polymeru za pomoci kapiláry, ale je možné vytvářet nanovlákná z celé vrstvy roztoku polymeru. K roznosu polymeru využíváme tvarovaných elektrod a následuje jejich částečné ponoření do polymerního roztoku. Tato technologie neobsahuje žádné části, které by se snadno zablokovaly. Výhoda tohoto spočívá v tvorbě vyššího počtu Taylorových kuželů, tím pádem narůstá produktivita, ale i homogenita nanovláknenné vrstvy (Elmarco, 2004–2013). Nanospider byl použit pro výrobu nanovláknenné vrstvy, která byla nanášena na podkladovou textilií meltblown.

2.5.2 Tiskárna Objet Connex 500

Tiskárna Objet Connex 500 využívá technologii Rapid prototyping. Je založena na principu inkoustových tiskáren a skládá se z různých hlavních částí. V poslední době dochází k velkému rozvoji technologií Rapid prototyping. Důsledkem je vyšší dostupnost tohoto zařízení pro vývoj, zlevňování a zrychlování výroby. Principem Rapid prototyping je rozřezávání 3D dat na rovinné vrstvy. Tloušťka vrstev je konstantní a je důležitým faktorem pro přesnost prototypu a detailní vykreslení výrobku. Data se musí převést do datového formátu STL, kde modely jsou tvořeny sítí rovinných trojúhelníků (Bíteš, 2000–2014). Trojrozměrný tisk se použil pro přesné natisknutí polymeru na nanovláknennou vrstvu v různých strukturách.

Objet Connex 500 je jedna z nejmodernějších 3D tiskáren na trhu. Tato tiskárna vyrábí rozměrné modely až do velikosti 500x400x200 mm a využívá technologii PolyJet Matrix. PolyJet Matrix je speciální technologie od izraelské firmy Objet. Využívá se na výrobu prototypů a umožňuje výrobu velmi kvalitních modelů z více různých materiálů. Tato tiskárna umožňuje dvoukomponentní tisk. To znamená, že je možné tisknout dva různé materiály v jednom tiskovém procesu (KVS, 2013).

Nejdůležitější částí je tisková hlava, která má 8 tryskových těles a každé tryskové těleso má 96 mikroskopických trysek. Jedna polovina tryskových těles nanáší stavební materiál na kovovou pracovní plochu a druhá polovina tryskových těles tiskne podpůrný materiál. Materiál je vytlačován přes trysky v tekuté formě. Používané materiály jsou akrylátové pryskyřice (fotopolymery) a následné jejich vytvrzování provádí UV lampy. Lampy jsou připevněny za tryskami, kde hned vytvrzují čerstvě nanesenou vrstvičku, a tím nedochází k deformacím materiálu.

Vrstvy materiálu se nanášejí na místo tisku, zvanou kovovou základnu, která je mechanicky pohybována nahoru a dolů. Tisková hlava vykonává jen posuv do stran. Všechny pohyby tiskové hlavy a základny má na starosti řídicí systém. U této tiskárny je místo na dvě náplně podpůrného materiálu a na dvě náplně stavebního materiálu. Odstraňování podpůrného materiálu je velmi snadné za pomoci proudu vody. Každá náplň váží 3,6 kg, což umožňuje tisknout nepřetržitě 72 hodin. Tato technologie disponuje tisknutím velmi malých vrstviček, například může být nanášena akrylátová pryskyřice o výšce 0,032 mm (Bíteš, 2000–2014). Nastavení tiskových režimů může být na digitální materiál (30 mikrometrů), vysoká kvalita (16 mikrometrů), vysoká rychlost (30 mikrometrů). Data z různých CAD programů, se musejí před výrobou převést do formátu STL. Rozměry tiskárny jsou; výška 1130 mm, délka 1120 mm, šířka 1420 mm a váha 500 kg. Provozní prostředí by mělo být mezi 18–22 °C a relativní vlhkost 30–70 % jinak výsledky výrobků nebudou dosahovat určené kvality.

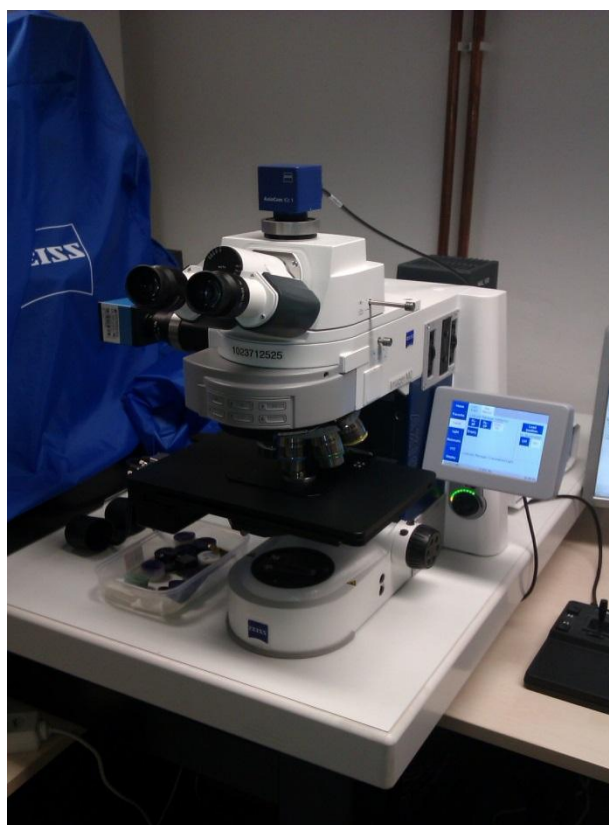
Systémy Objet jsou používány v mnoha průmyslových odvětvích; školství, lékařství, zdravotnické přístroje, zubní oddělení, spotřební elektronika, automobilový průmysl, hračky, spotřební zboží, obuvnický průmysl a další. Společnost Objet byla založena v roce 1998 a je zastoupena se po celém světě (Objet, 2011).



Obr. 4: Tiskárna pro 3D tisk. (Stratasys, 2012).

2.5.3 Optický mikroskop

Mikroskop Carl Zeiss Axio Imager M2M disponuje snímací kamerkou s přenosem na počítač, kde je prováděna analýza, snímkování obrazu a uložení na disk. Použití optického mikroskopu byl důležitý krok pro zobrazení finálních vzorků a jejich optické porovnání dokonalosti natisknutých vzorů na nanovláknennou strukturu. Zvětšení se pohybuje od 25x až 1000x a teoretické maximální zvětšení je až 2000x. Fyzikální vlivy nás omezují délkami světelných vln (ABE.TEC, 2014).



Obr. 5: Mikroskop Carl Zeiss Axio Imager M2M. Zdroj vlastní.

2.5.4 Naprašovací/napařovací zařízení

Quorum Q150R ES je kombinované zařízení sloužící jako napařovačka uhlíku a naprašovačka zlata, platiny, stříbra a palladia. Naprašuje se proto, aby se povrch vzorků stal vodivým a mohl být použit pro analýzu v rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM). Vzorky byly povrstveny třemi nanometry zlata. Poté byly vytvořeny snímky se zvětšením až 500 mikrometrů, které u optického mikroskopu není možné. Naprašovací zařízení je schopno měřit nanášené vrstvy na požadované vzorky.

Maximální provoz je 60 minut pro silné vrstvení bez přerušení vakua. Vakuum je zařízeno Argonem (EDLIN, 2001).

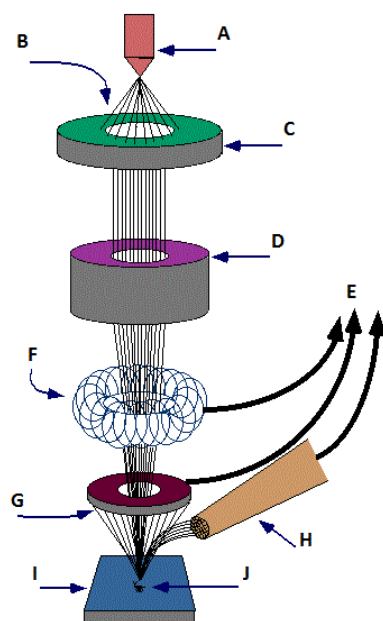


Obr. 6: *Naprašovací/napařovací zařízení Quorum Q150R ES. Zdroj vlastní.*

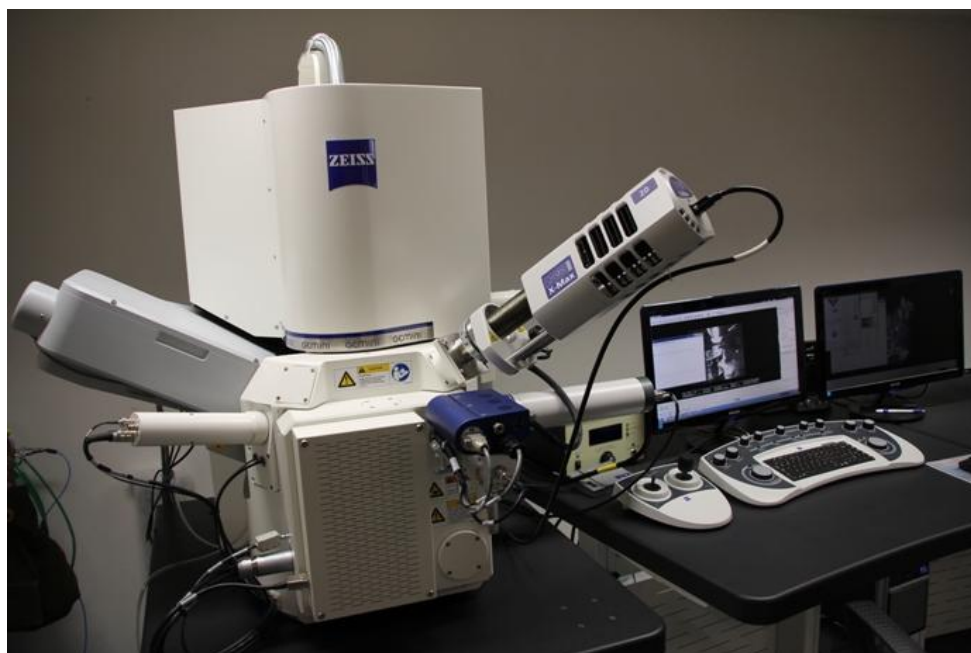
2.5.5 Rastrovací elektronový mikroskop (SEM)

Použití rastrovacího elektronového mikroskopu bylo nutné, protože optickým mikroskopem jsme nedokázali provést tak vysoké a detailní zvětšení pro prozkoumání vzorků. Pro následné hodnocení bylo zapotřebí vytvořit snímky s vysokým přiblížením.

Mikroskopem UHR FE-SEM Carl Zeiss ULTRA Plus lze vytvořit 3D model obrazu. Maximální rozlišení zařízení 1 nm při napětí 15 kV nebo 1,6 nm při napětí 15 kV. Zvětšení SEM je 12–1 000 000x. S urychlovacím napětím 0,02–30 kV. Mikroskop využívá rentgenového záření a také schopností rozeznat chemické sloučeniny. Možnost 3D zobrazení pomocí 4-kvadrantového detektoru. Toto zařízení disponuje mikroanalytickým systémem OXFORD Instruments (nanomateriály, 2013). Objekt je napadán úzkým svazkem elektronů, jehož průměr má 5-10 nm. V elektromagnetické čočce v objektivu se nachází dva páry vychylovacích cívek, které mohou elektrony vychylovat ve dvou směrech na sebe kolmých. Proud procházející vychylovacími cívkami způsobuje, že bodová stopa elektronového paprsku se pohybuje po povrchu zkoumaného objektu ve 300–800 řádcích. Odražené primární elektrony a vyražené sekundární elektrony jsou snímány detektorem. Pomocí fotonásobiče a zesilovače se řádkováním signál skládá do celého obrazu. Kvalita obrazu závisí na zvolení rychlosti řádkování obrazu (Kufner, 2012).



Obr. 7: Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu: A) elektronové dělo, B) elektronový paprsek, C) anoda, D) magnetická čočka, E) TV skener, F) skenovací cívka, G) detektor odražených elektronů, H) detektor sekundárních elektronů, I) fáze, J) vzorek. (Laboratoř, 2008).

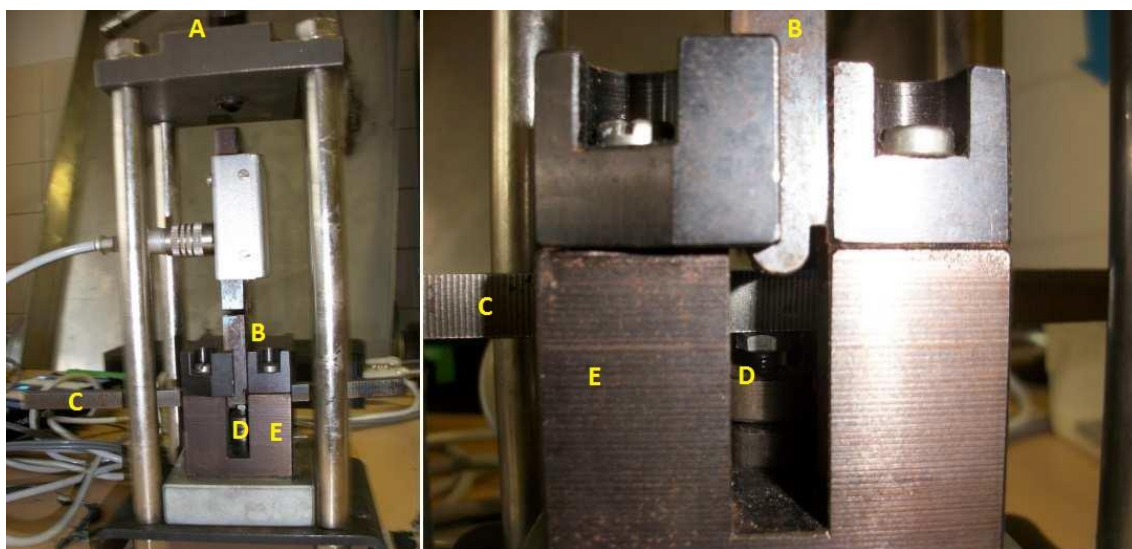


Obr. 8: Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) UHR FE-SEM Carl Zeiss ULTRA Plus. Zdroj vlastní.

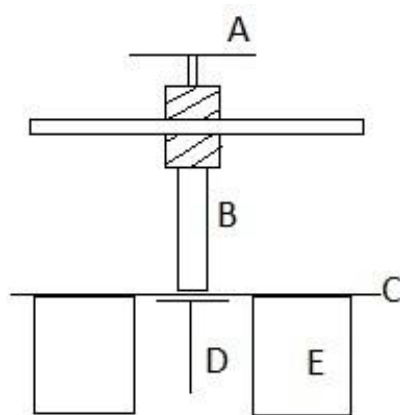
2.5.6 Mikroohybový přístroj

Mikroohybový přístroj byl použit, abychom zjistili mechanické vlastnosti vzorků. A to velmi malé deformace a napětí ve vzorcích při nízkém zatížení úměrné zkoumanému materiálu.

Mikroohybová zkouška, oproti standardní ohybové zkoušce, udává velmi malé deformace a napětí v materiálu. Pro zkoušku se používají malé vzorky. Zařízení se skládá s podpor, které jsou od sebe vzdálené 25–40 mm, kde se pokládá vzorek. Mezi podporami je umístěn snímač průhybu. Nad snímačem průhybu se nachází zkoušený materiál, který je zatěžován ohybníkem, kterým se měří síla. Ručním otáčením šroubu s jemným trapézovým závitem zatěžujeme materiál. Rozměry přístroje jsou malé 60x60x180 mm. Naměřené údaje se zaznamenávají do počítače pro následné zpracování (Andršová Z., 2013).



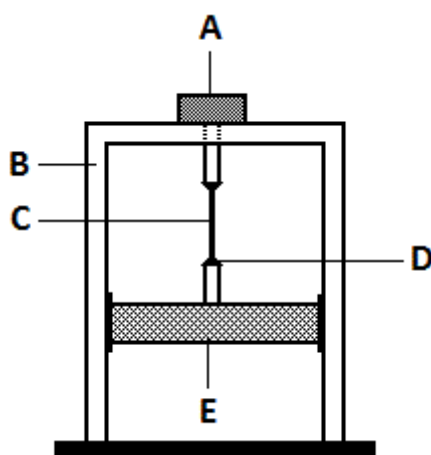
Obr. 9: Mikroohybový přístroj: A) zatěžovací šroub, B) ohybník (senzor na měření síly), C) zkoumaný materiál, D) snímač průhybu, E) podpory. Zdroj vlastní.



Obr. 10: Schéma mikroohybového přístroj: A) zatěžovací šroub, B) ohybník (senzor na měření síly), C) zkoumaný materiál, D) snímač průhybu, E) podpory. Zdroj vlastní.

2.5.7 Zkouška tahem

Zkouška tahem, je nejrozšířenější mechanická zkouška, která pojednává o odolnosti materiálu. Na zkoušený vzorek působí rovnoměrně vzrůstající síly až do přetržení. Zařízení zaznamenává do počítače průběh deformace vzorku a stanoví napětíové a deformační charakteristiky. Počítač zobrazí graf a průběh tahové křivky zatěžovaného vzorku. Určujeme čtyři základní mechanické vlastnosti. Mez pevnosti v tahu R_m MPa, mez kluzu v tahu R_e MPa, tažnost (A) je trvalá podélná deformace v %, kontrakce (Z) je největší trvalé zúžení průměru po přetržení v %.



Obr. 11: Schéma zkoušky tahem: A) měřicí čidla, B) pevný rám, C) deformovaný vzorek, D) čelisti pro uchycení vzorku, E) pohyblivý příčník. Zdroj vlastní.

3 Experimentální část

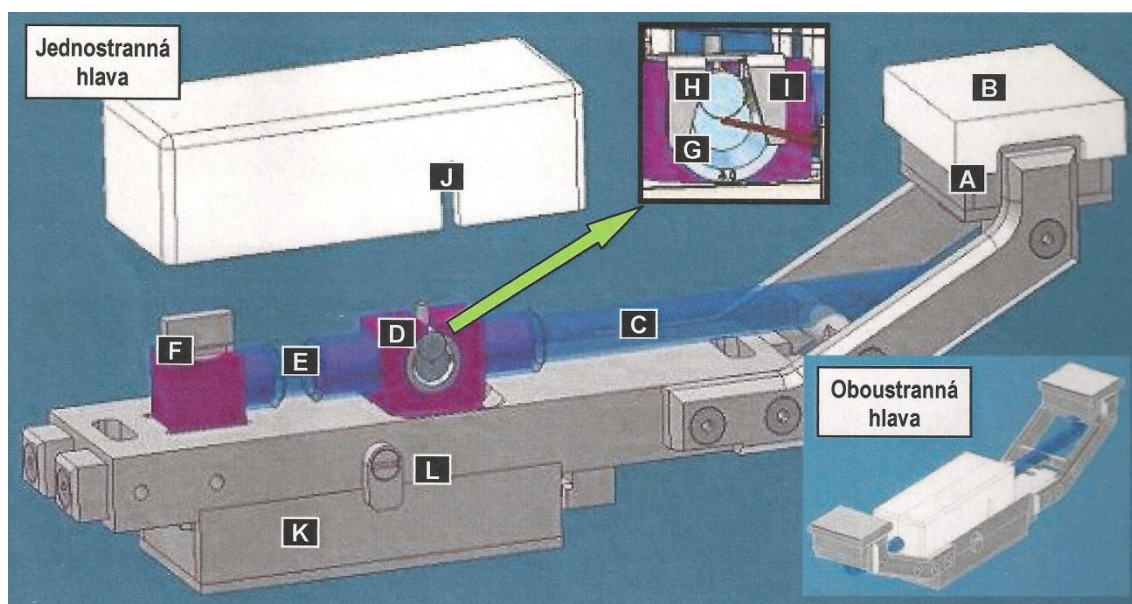
Tato část pojednává o celém procesu přípravy a výroby všech materiálů. Popsaný postup je časově zaměřen a popisuje zmíněné experimenty krok po kroku.

3.1 Příprava Polykaprolaktonu

Pro přípravu roztoku polykaprolaktonu (PCL) s molekulovou hmotností 45000 Mw byl použit rozpouštědlový systém chloroform, ethanol. Byl připraven finální roztok o koncentraci 18 wt % PCL.

3.2 Výroba nanovlákněné vrstvy

Experiment byl prováděn na zařízení Nanospider (NS 1WS500U) od firmy Elmarco. Do Nanospideru byla provedena montáž strunové statické elektrody s jednostrannou hlavou. Byly nastaveny výchozí parametry linky, kdy na elektrodě bylo 18,3 kV a na kolektoru -10,9 kV. Teplota byla 21,5 °C. Nastavení vzdálenosti elektrody a kolektoru bylo 130,5 mm. Rychlost nanášecí hlavy byla 198,9 mm/s. Roztok polymeru byl nalit do zásobní nádržky, ze které samovolně vytéká a dostává se k průvlaku přívodní trubičkou. Průvlak je kovová vložka s kalibrovaným otvorem pro vedení drátu. Použitý průvlak měl kalibrovaný otvor o průměru 0,5 mm. Polymerní roztok byl nanášen na drát nanášecí hlavou. Na drátě se roztok rozpadá na kapičky a vznikají Taylorovy kužele, ze kterých byla vytvořena nanovlákněná vrstva na podkladovém materiálu meltblown. Nanesená nanovlákněná vrstva s podkladovým materiálem byla sejmuta ze zařízení k přípravě pro 3D tiskárnu.










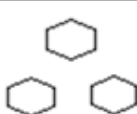



Obr. 12: Schéma nanášecí hlavy: A) zásobní nádržka, B) víčko nádržky, C) přívod roztoku, D) distribuční hlava, E) retenční trubička, F) vypouštěcí kohout, G) průvlak, H) zajišťovací vložka, I) zajišťovací svorka, J) krytka průvlaku nanášecí hlavy, K) retenční nádobka, L) aretace retenční nádobky. (Elmarco, OM).

3.3 Navržení struktury nosiče

V počáteční fázi byla navržena struktura pro budoucí tkáňové nosiče. Požadavky byly kladeny hlavně na rozměry tisku. Pozornost byla soustředěna především na velikosti mezer ve vzorku, nebo-li vytvoření pórů. Požadavek byl od 400 mikrometrů do 1500 mikrometrů. Dále byl dán výškový požadavek, a to vytvořit co nejvyšší výšku vzorů, ale s co nejmenší šířkou stěn vzoru. Výška byla od 0,15–0,3 mm. Bylo provedeno 11 nákrešů vzorů. Od jednoduchých až po složitější obrazce. Nákrasy byly nejprve vyhotoveny v náčrtu na papír s požadovanými rozměry, a poté byly narýsovány v CAD programu. Vzory byly přeneseny do formátu STL pro 3D tisk. Pro přehlednější orientaci v jednotlivých typech vzorů byly údaje přeneseny do tabulky (Tab. 1). Tabulka obsahuje druhy matic, vzorů, zadaných hodnot a průměrných naměřených hodnot výsledných vzorů.

Porovnávací tabulka vzorků.

Matice	Vzor	Průměry, délky	Zadané hodnoty		Průměrné naměřené hodnoty	
			menší	větší	menší	větší
T1a		průměry útvarů	150	300	180,11	450,9
		vzdálenost útvarů			1020,86	
		průměr pórů	1500		1641,68	
T1b		šířka stěny →	75		155,9	
		šířka stěny ↑	150		208,22	
		průměr pórů	1500		1448,79	
T1c		šířka stěny	150		140,71	
		průměr pórů	1500		1448,79	
T2a		vzdálenost útvarů			1110,56	
		průměr útvarů	150		248,86	
T2b		vzdálenost útvarů			1110,56	
		průměr útvarů	150		248,86	
T2c		průměry útvarů	150	300	150,25	468,59
		vzdálenost útvarů			1197,74	
T3a		průměr pórů	700		514,37	
		šířka stěny	150		259,14	
T3b		průměr pórů	850		656,14	
		šířka stěny	150		260,01	
T3c		průměr pórů	500		312,82	
		šířka stěny	100		174,69	
T4a		póry mezi hexagony	660		481,11	
		vnitř. póry hexagonů	500		216,63	
		šířka stěny	100		173,93	
T4b		průměr pórů	700		483,81	
		šířka stěny	150		233,36	
Hodnoty jsou naměřeny v mikrometrech.						

Tab. 1: Porovnávací tabulka zadaných a reálných hodnot. Zdroj vlastní.

3.4 Příprava pro 3D tiskárnu

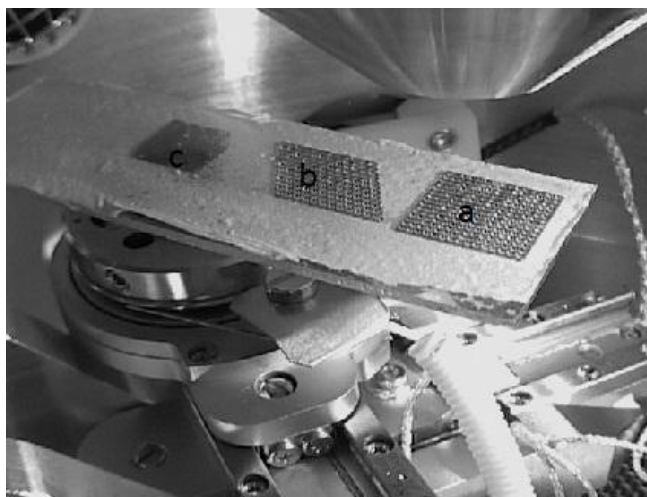
Přichycení nanovláken na kovovou tiskovou základu 3D tiskárny bylo velmi složité. Nanovláknna jsou jemná, tiskárna je může poškodit nebo nasát do tiskové hlavy. Proto bylo potřeba tomuto předejít a zvýšit adhezi nanovláken k hladkému povrchu.

Také bylo potřeba, aby nanovláknna bylo možno dobře sejmout po tisku a neporušit vytvořené vrstvy.

Nanovláknna byla na podkladové textilií nastříhána do velikosti podložního sklíčka (26 x 76 mm) pro mikroskopy. Pro zvýšení adheze nanovláken k podložnímu sklíčku byla zvolena technická mletá želatina č. 5. Želatina byla použita pro její rozpustnost ve vodě a její vymytí. Vymývání bylo důležité pro odstranění želatiny od vzorků a pro lepší snímání nanovláknenné vrstvy z podložního skla. Byl připraven 18 % hmotnostní roztok želatiny v poměru 1 g želatiny na 4 g vody. Rozpuštěná želatina byla rovnoměrně nanесena na podložní sklíčka a na tyto byla přiložena nanovláknna s podkladovou textilií. Podkladová textilie byla poté stržena. Pro finální tisk byla použita větší skla s rozměry (49 x 209 mm) a odlišná technologie nanášení želatiny pro zlepšení snímání nanovláken z podložního skla. Želatina nebyla nanášena plošným rozetřením po celém podložním sklu, ale byla injekční stříkačkou nanášena v úzkých pruzích, s rámuujícím pruhem po celém okraji.

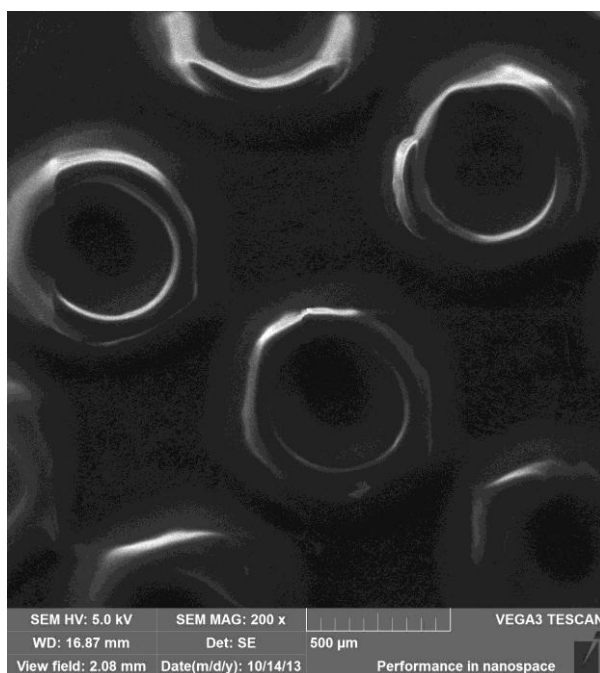
3.5 Tisk zkušebních vzorků a výběr finálních struktur

Navržené vzory v přibližných rozměrech 10 x 10 mm byly připraveny na tisk. Nejprve bylo natisknuto 186 vrstev podpůrného materiálu s označením FullCure705, aby si tiskárna vymezila prostor pro výšku podložního sklíčka a mohla tisknout stavebním materiálem. Po 186 vrstvách byl tisk zastaven a podpůrný materiál odstraněn. Místo podpůrného materiálu bylo do levého horního kraje základové kovové desky 3D tiskárny umístěno podložní sklíčko s nanovláknny. Jeho přichycení bylo provedeno lepíciimi samolepkami k základové desce. Kdyby nebylo podložní sklíčko upevněno, došlo by k jeho posunu při tisku. Poté byl spuštěn tisk, který provedl zbývajících 19 vrstev stavebního materiálu s označením VeroClear do celkového procesu tisku 203 vrstev. Byly použity 4 podložní sklíčka, na které bylo natištěno 11 vzorů.



Obr. 14: Podložní sklíčko s nanovláknny a 3D tiskem (vzory T3a,b,c). Zdroj vlastní.

Po natisknutí vzorů bylo provedeno první zdokumentování mikroskopem a pořízení obrázků pro obrazovou analýzu. Data byla naměřena a zprůměrována. Poté byly porovnány zadané hodnoty s reálnými hodnotami. Viz porovnávací tabulka (Tab. 1). Z výsledků jsou patrné odchylky vytištěných vzorů, které se neshodují se zadanými hodnotami v tabulce. Odchylky byly patrně způsobeny výškou matice. Vyplněná tabulka byla vodítkem pro rozhodování a další vybírání finálních vzorů. Tím byly průměry prostorů ve vzorech menší. Například na obrázku číslo 14, viz níže, kde byly natištěny hexagony, které spíše představují kulaté útvary.



Obr. 15: Snímek s natištěnými hexagony (vzor T4a). Zdroj vlastní.

Pro finální tisk byly vybírány vzory podle prostoru mezi útvary, nebo prostoru ve vnitřní části útvarů. Bylo požadováno, aby prostor v reálném natištěném vzoru byl více než 400 mikrometrů. Vybrány byly čtyři vzory; čtvercové T1b, T3a a hexagonové T3b a T4a.

3.5.1 Příprava pro 3D tiskárnu finálních struktur

Po vybrání čtyř finálních vzorů bylo navrženo zvětšení tisknutých matic a vytvoření větších vzorů pro další testování. Matice byly přibližně zvětšeny na rozměry 60 x 60 mm. Pro tisk bylo použito velké podložní sklo. Pro zlepšení snímání po tisku byly odzkoušeny jiné typy přichycení nanovláken na podložní sklo. Vyzkoušeny byly přichycené vrstvy podkladové textilie, na které byla nanosena nanovlákná. Poté byly jen nanovlákná přichycena na podložní sklo želatinou nanosenou do pruhů.

3.5.2 Tisk finálních struktur

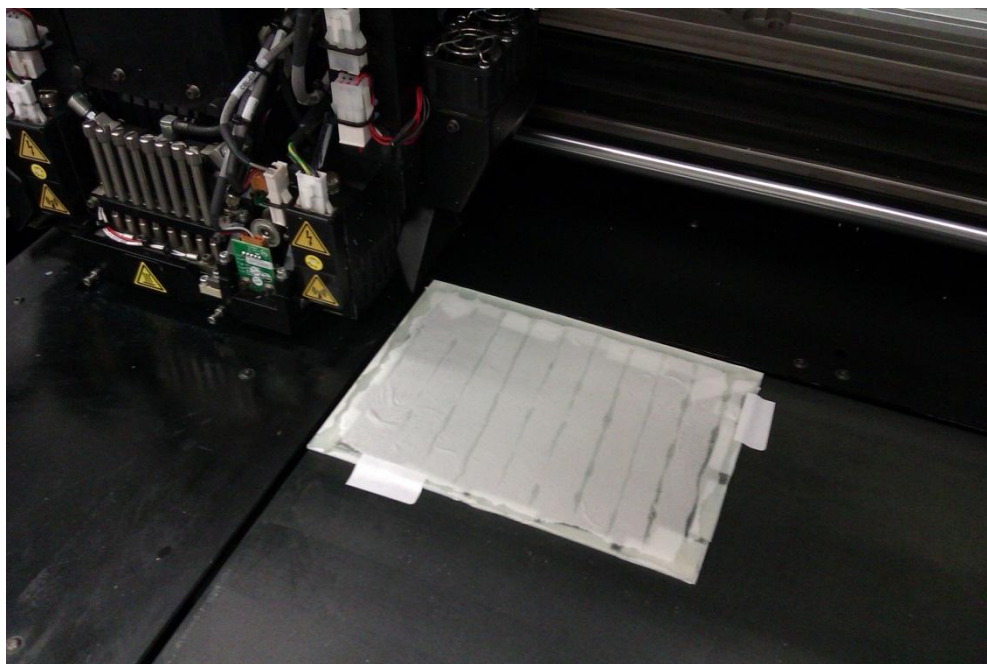
Po zvětšení matic a příprav pro tisk nastal čas pro první tisk zvětšených matic. Tisk byl započat nanášením podpůrného materiálu, který byl následně odstraněn. Jak je možné vidět na obrázku číslo 15. Po odstranění podpůrného materiálu byla odzkoušena verze s přichycenými nanovláknami na podkladové textilii. Tisk byl spuštěn, po dvou přejetí tiskové hlavy byla nanovlákná stržena a nasáta do tiskové hlavy. Důvodem byla špatná adheze nanovláken k podkladové textilii a chlazení tiskové hlavy ventilátorem, který vířil vzduch. Tisk byl zastaven a zrušen. Tisková hlava byla zanesena nanovláknami a bylo ji potřeba vyčistit.



Obr. 16: *Nanesení podpůrného materiálu na základovou kovovou desku. Zdroj vlastní.*

Další zkušební tisk byl vykonán na nanovlákná, která byla přímo připevněna na podložní sklo. Poprvé bylo vyzkoušeno podložní sklo s nanovlákný připevněnými pruhy želatiny. Bylo provedeno spuštění tisku a bylo nanесeno 183 vrstev podpůrného materiálu, následně byl tisk pozastaven. Poté byl tento materiál odstraněn a na jeho místo se položilo připravené sklo. Bylo zajištěno proti možnému pohybu samolepkami k základové desce. Tisk byl znovu spuštěn a bylo dotisknuto zbývajících 19 vrstev stavebního materiálu. Po tisku byla překontrolována dokonalost natištěných vzorů. Nanovlákná držela na svém místě a vzory byly správně natištěny. Bylo rozhodnuto pro finální tisk, ale s jiným tiskovým materiálem. Materiál pro finální tisk měl označení MED 610 a jeho biodegradabilní vlastnosti byly stejné, jako u nanovláken z polykaprolaktonu. Výměna materiálu pro finální tisk trvala přibližně 2 hodiny. Pro finální tisk s MED 610 byly zhotoveny pro případný neúspěch nebo náhlé poruchy vytvořených materiálů dvě skla s nanovlákný.

Vše bylo připravováno pro finální tisk; vyměněn stavební materiál, nastavení tiskárny a připravena podložní skla, ze kterých byl stržen podkladový materiál spunbond. Tisk byl spuštěn jako v předešlých experimentech. Byl ale proveden chybný výpočet zastavení tisku, podpůrný materiál tedy musel být stržen i s pěti vrstvami materiálu podpůrného. K zastavení tisku došlo až na 188. vrstvě a to bylo o 5 vrstev více než u předchozího tisku. Po stržení podpůrného materiálu s 5 vrstvami MED 610 bylo na základovou desku vloženo podložní sklo. Viz obrázek číslo 17.

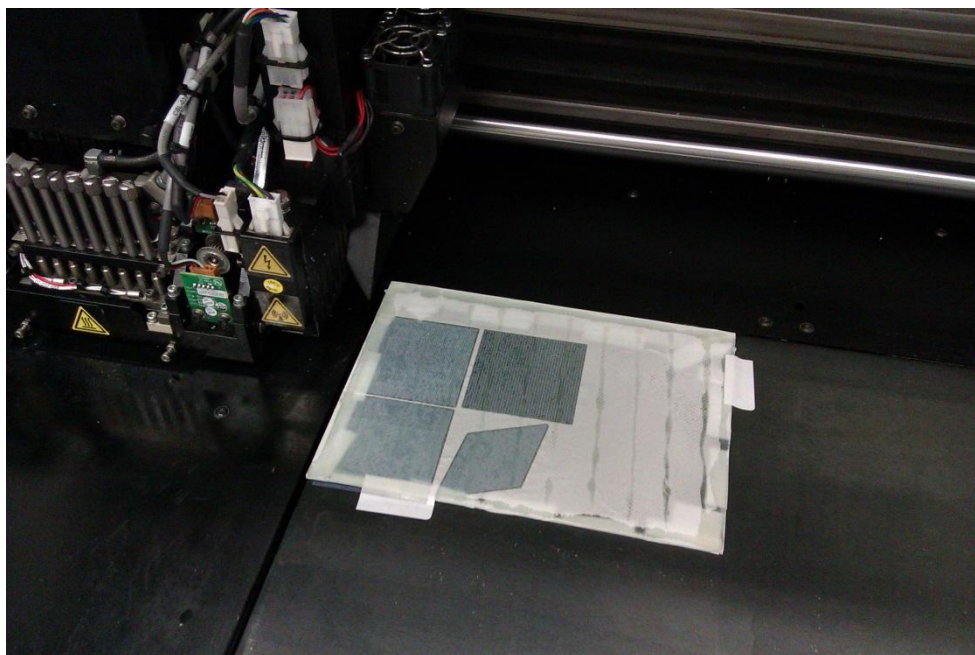


Obr. 17: *Podložní sklo s nanovlákný připevněno k základové kovové desce.
Zdroj vlastní.*

S chybným vypočítáním zastavení tisku byl začátek nanášeného stavebního materiálu bez pěti počátečních vrstev. Zjištění tohoto problému nastalo až při samotném tisku, kdy bylo zrakem patrné, že tisk není úplný. Na obrázku číslo 18 je patrná neúplnost tisknutých vzorů.



Obr. 18: *Finální tisk, první sklo. Zdroj vlastní.*



Obr. 19: *Finální tisk, druhé sklo potištěné vzory. Zdroj vlastní..*

Po zhotovení prvního skla byl spuštěn tisk pro druhé sklo. Podle propočtů bylo zastavení tisku provedeno na 183. vrstvě. Po stržení podpůrného materiálu bylo opět tisknuto na podložní sklo s nanovláknny. Skla s natištěnými vzory byla hotova, a poté bylo zkoumáno jak oddělit nanovláknennou vrstvu s natištěnými vzory od podložního skla. Možnosti byly dvě; rozpuštění želatiny vodou, nebo šetrné odřezávání natištěného materiálu. Ovšem rozpuštěním želatiny vodou, a tím pádem namočením vzorků, mohlo dojít k jejich poničení. Šetrnějším způsobem bylo odřezání za pomoci žiletky a pinzety. Bylo tedy provedeno ořezání okrajů vzorů a následně nadzvednutí kompozitu. V místech nanesené ztuhlé želatiny bylo provedeno opatrné nadzvednutí kompozitu a želatina byla prořezána.



Obr. 20: *Snímání kompozitu podřezáváním žiletkou. Zdroj vlastní.*

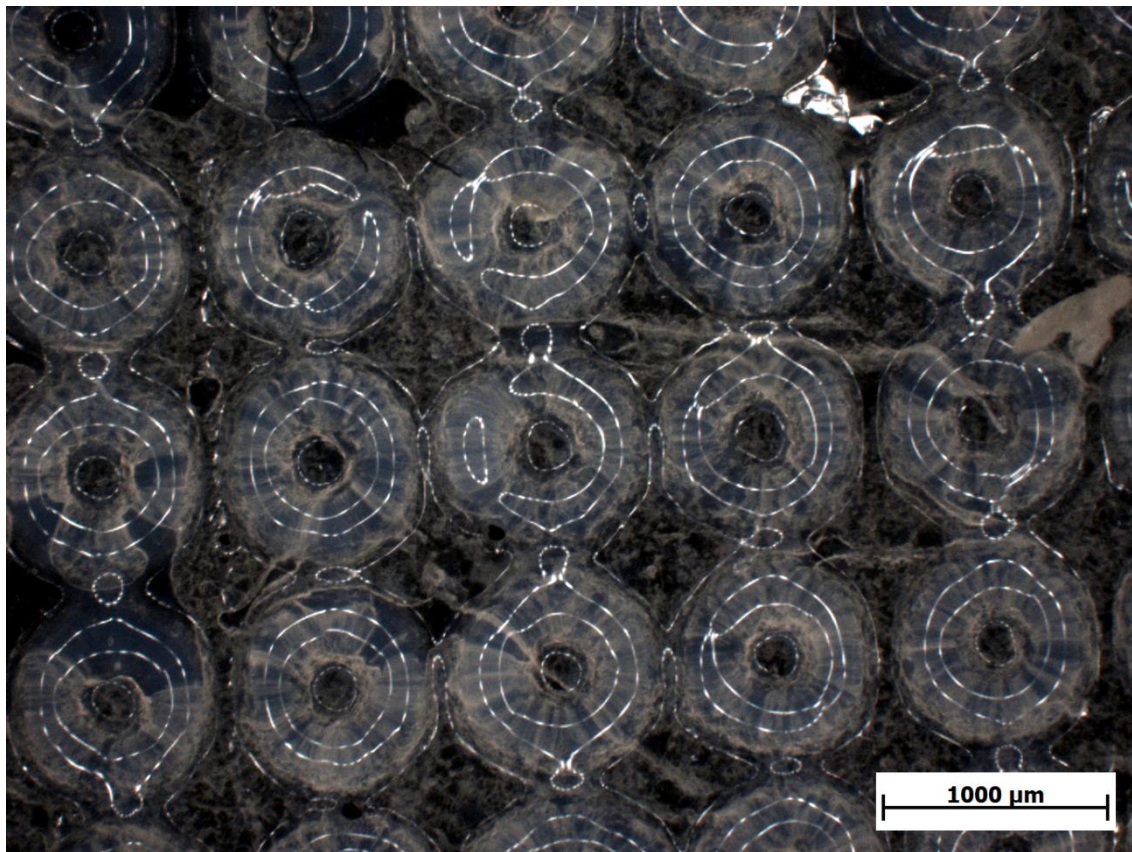
3.6 Mechanické testování

Testování vyrobených 12 vzorků bylo provedeno v laboratořích čtyřmi zkouškami. Byly testovány následné vzorky; z polymeru s označením VeroClear, další z polymeru MED 610 z finálního tisku a vzorky celé a vzorky bez 5 vrstev stavebního polymeru. Testování bylo prováděno analýzou optickým mikroskopem a rastrovacím elektronovým mikroskopem. Byly zhotoveny snímky vzorků. Mikroohybová zkouška a zkouška tahem byly náhodným pokusem o realizaci.

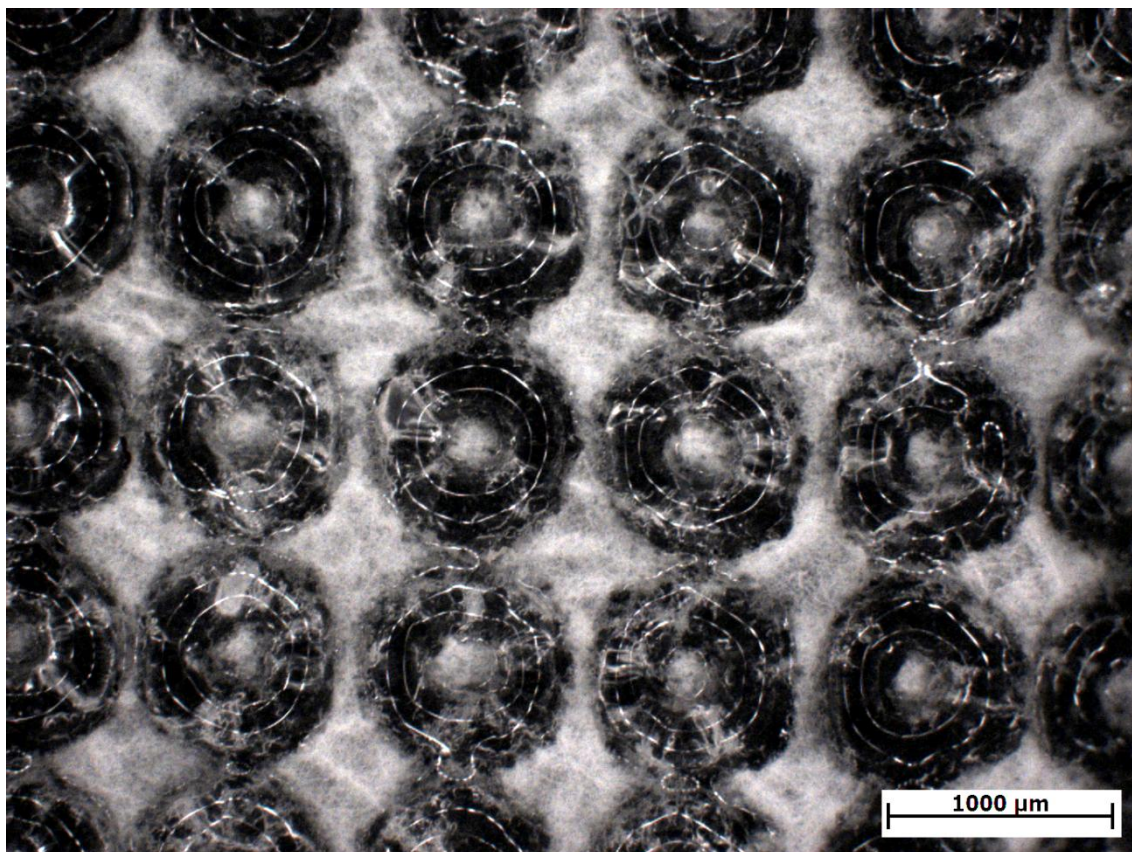
3.6.1 Analýza optickým mikroskopem

Analýza byla prováděna optickým mikroskopem Carl Zeiss Axio Imager M2M. Každý vzorek byl zvětšen 25x a 50x. Okulár zvětšení 10x a objektiv 2,5x, nebo 5x. Zaostřování bylo realizováno od nejvyššího bodu až na bod nejnižší (nanovlákná). Poté bylo spuštěno snímkování. Po snímkování bylo automaticky provedeno poskládání snímku do jednoho obrazu s co největším zaostřením na detaily. Dále bylo na snímku vytvořeno měřítko pro představu velikosti. U každého vzorku vznikly dva snímky. Dohromady bylo vytvořeno 24 snímků ze všech vzorků. Na vzorkách s polymerem MED 610 chybějícími vrstvami a kompletním tiskem byly patrné velké rozdíly, které byly více zdokumentovány a analyzovány na rastrovacím elektronovém mikroskopu.

Na snímcích T4a s 24 násobným zvětšením byly ukázány rozdíly finálního tisku s polymerem MED 610. Na druhém snímku byly patrné změny v podobě bílých ploch. Bílé plochy byly nanovláknna na povrchu. Dále viz příloha 1.



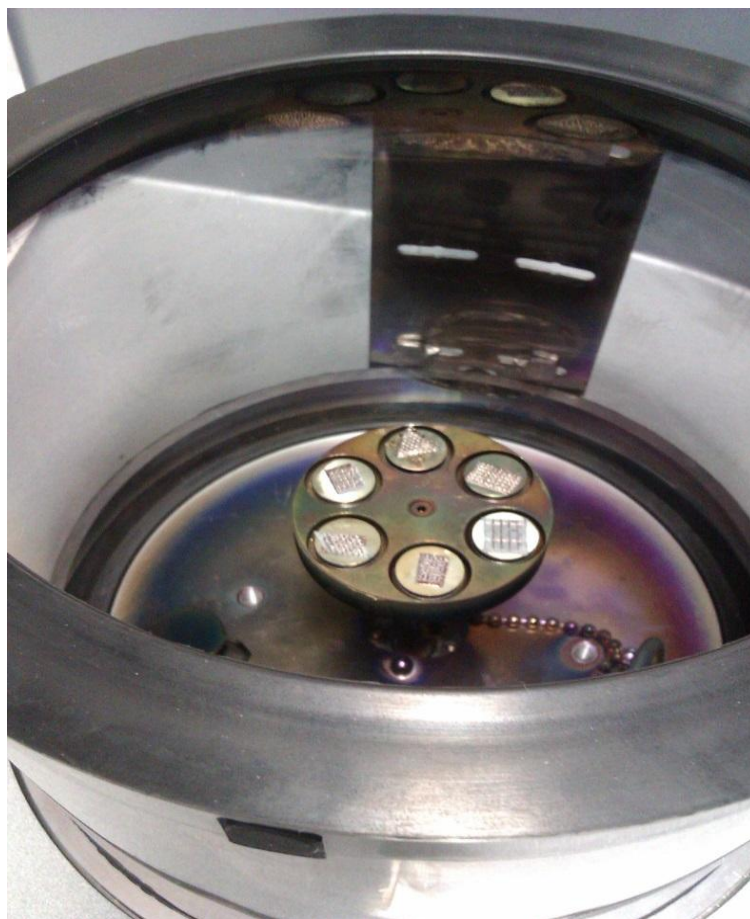
Obr. 21: Snímek vzoru T4a, zvětšení 24x. MET 610. Zdroj vlastní.



Obr. 22: *Snímek vzoru T4a, zvětšení 24x. MED 610 bez 5 vrstev. Zdroj vlastní.*

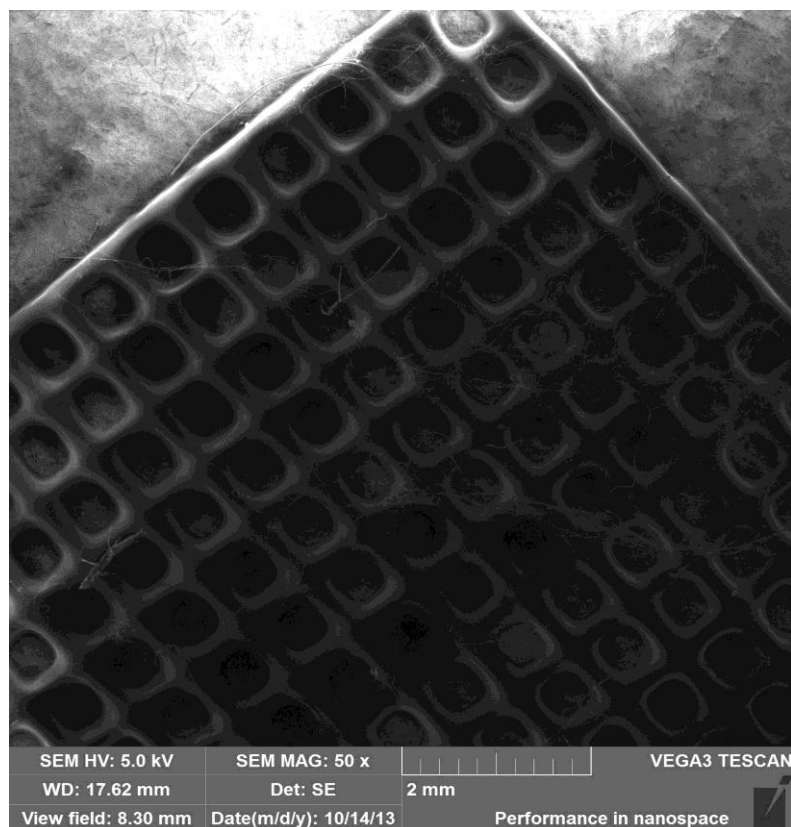
3.6.2 Analýza rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM)

Před analýzou rastrovacím elektronovým mikroskopem byla provedena příprava vzorků pozlacením. Do držáku byly vloženy malé terčíky pro nalepení vzorků na pozlacení. Na každý terčík byla nalepena oboustranná karbonová páska. Z každého vzorku byla přibližně ustřižena část 5 x 5 mm. Poté byl každý vzorek nalepen na karbonovou pásku jednoho stolečku. Celý držák se stolečky byl přemístěn do zlatičky na pozlacení. Bylo nastaveno pozlacení třemi nanometry zlata. Pozlacováno bylo po šesti vzorcích, viz obrázek č. 23. Poté byl držák se stolečky přesunut do prostoru rastrovacího elektronového mikroskopu.

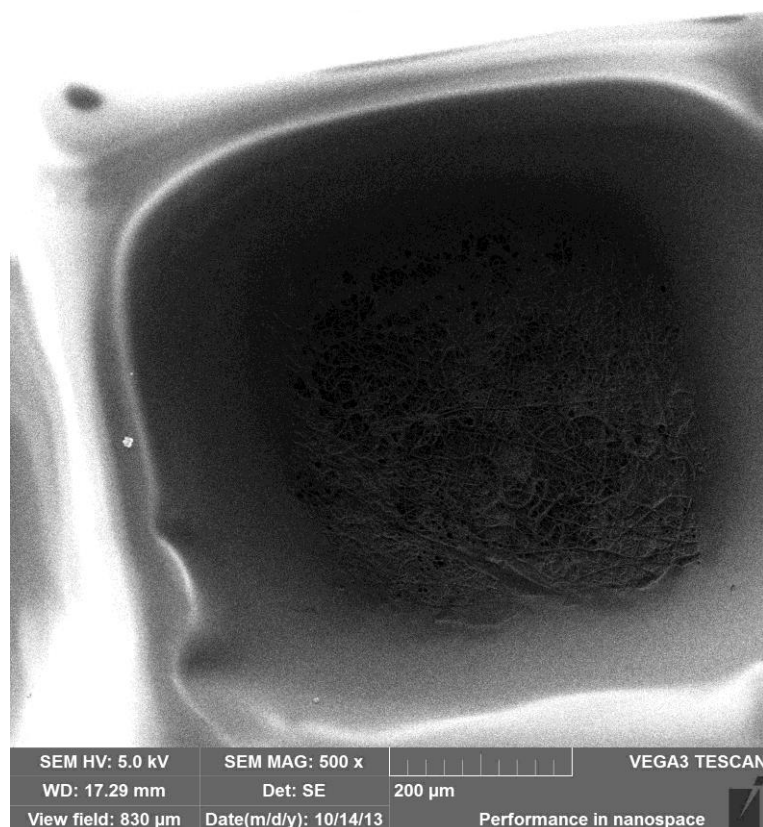


Obr. 23: *Držák stoleček s pozlacenými vzorky. Zdroj vlastní.*

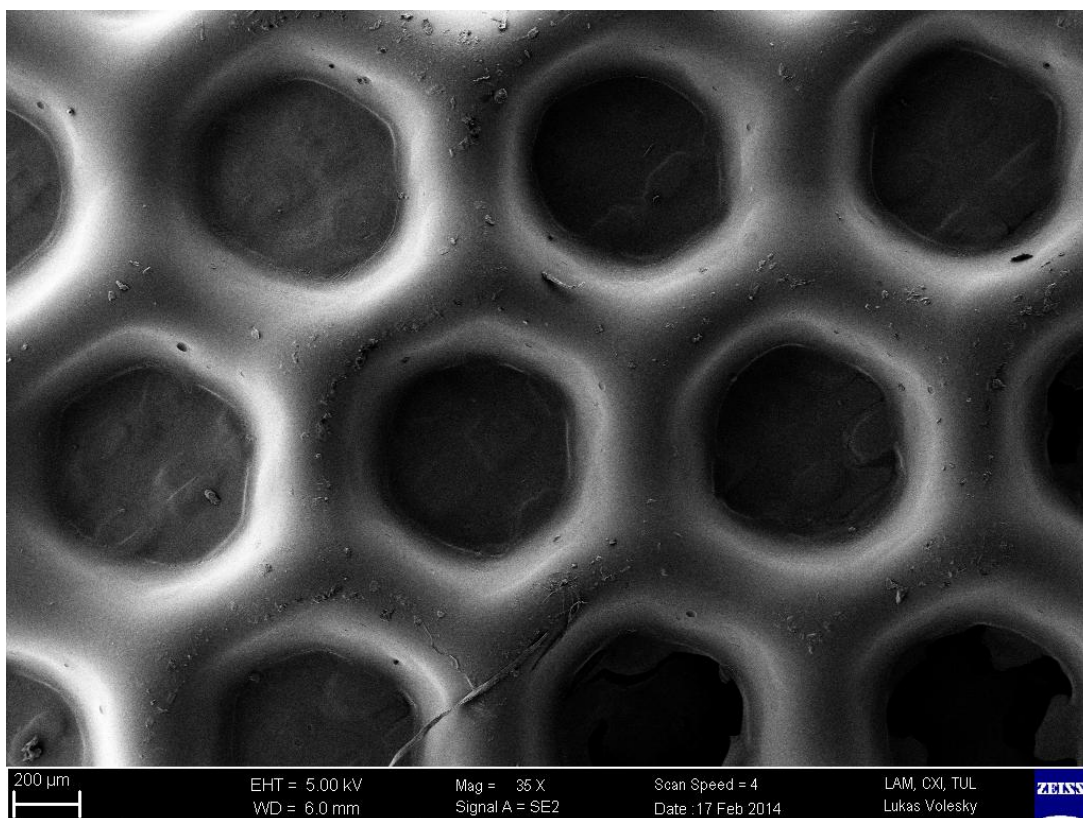
Analýza vzorků byla provedena na mikroskopu UHR FE-SEM Carl Zeiss ULTRA Plus. Byl vybrán první vzorek ke snímání. Na tyto vzorky bylo nastaveno napětí 2,5 kV nebo 5 kV. U většiny vzorků bylo provedeno zvětšení 35x, 50x, 100x a 500x. Na kompletních vzorcích bylo zaměřeno vybrané místo s cílem ukázat, jestli jsou nanovlákná i na povrchu tisknutého materiálu. U obrázků č. 26, viz níže, s polymerem VeroClear kompletní a bez pěti vrstev byl zobrazen rozdíl ve finálních vrstvách. Na snímcích s materiálem VeroClear a s MED 610 byla snaha zobrazit a zaostřit nanovlákná do vnitřních hexagonů. Další snímky viz příloha č. 2. Při ostření byl propalován tisknutý materiál. Důsledkem byl jeho lesklý a hladký povrch. Pod celým nánosem byla nanovláknenná vrstva, která nebyla vidět. U druhého snímku bylo zaměřeno na přechod natištěného materiálu MED 610 bez pěti vrstev a zobrazené nanovláknenné vrstvy. Po snímkování byla na řadě mikroohybová zkouška.



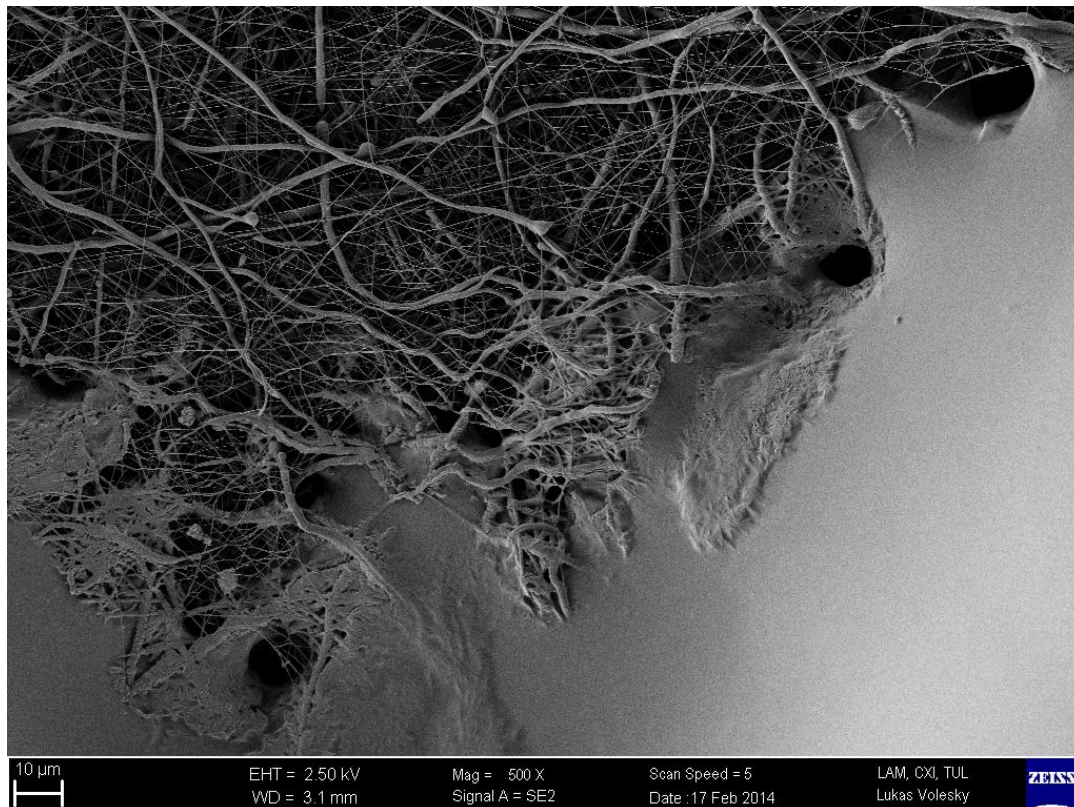
Obr. 24: Snímek vzoru T3a, zvětšení 50x. Nezlaceno. VeroClear. Zdroj vlastní.



Obr. 25: Snímek vzoru T4b, zvětšení 500x. Nezlaceno. VeroClear. Zdroj vlastní.



Obr. 26: Snímek vzoru T3b, zvětšení 35x. VeroClear. Zdroj vlastní.



Obr. 27: Snímek vzoru T4a, zvětšení 500x. MED 610 bez 5 vrstev. Zdroj vlastní.

3.6.3 Mikroohybová zkouška

Vzorky byly nastříhány na proužky 10 x 60 mm. Bylo připraveno zařízení na snímání a nastaven přístroj. Nejprve do přístroje byly vloženy pouze nanovlákná, ale vzorek nebyl dostatečně pevný a ohýbal se. U tohoto vzorku nebylo možné provádět měření. Poté byl vložen vzorek nanovláken zpevněný trojrozměrným tiskem. Vzorek byl pevnější, ale nebyl dostatečně pevný, aby nevykazoval deformaci bez zatížení. Znovu nebylo možné provádět měření. Od této zkoušky bylo pro neúspěch upuštěno. Další prováděné měření bylo přesunuto na zkoušku tahem.

3.6.4 Zkouška tahem

Vzorky, které byly připraveny na mikroohybovou zkoušku byly použity na zkoušku tahem. Byla provedena příprava zařízení a upnutí nanovláken do čelistí. Zkouška byla spuštěna s posunem 2 mm za minutu. U nanovláken nastal kluz a měření bylo přesunuto na nanovlákná s trojrozměrným tiskem. Kompozit T1b byl upnut do čelistí s posunem čelisti 5 mm za minutu. Vzorek byl oproti samostatným nanovláknům pevnější. Vypočtené údaje nebyly tak razantní pro záznam zařízení. Od zkoušky proto bylo upuštěno pro nezaznamenání síly. Na obrázku č. 28 se nachází protokol o zkoušce tahem s nulovou silou.

Vstupní údaje

Datum testu :

4.3.2014

Číslo vzorku :

N3

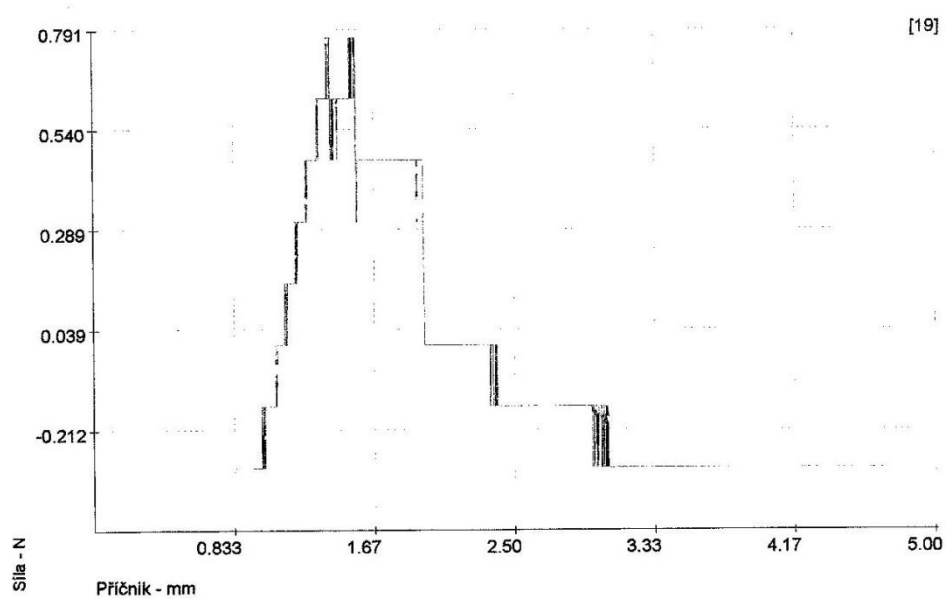
Typ vzorku :

Název materiálu :

Nano

Vypočtené údaje

Zkouška	F _{max} N
19 V	0.00



Obr. 28: Protokol o zkoušce tahem, vzorek T1b. Zdroj vlastní.

4 Diskuse výsledků

Experiment, který byl proveden, byl pokusem kombinace 3D tisku na nanovlákná. Navazujícím experimentem by mohlo být vrstvení vyrobeného kompozitu na sebe a následné zvláknění. Cílovým experimentem by mohlo být vytvoření kompozitu tak pevného a pružného, aby se dal srovnat s biologickou tkání např. chrupavkou a biologicky testovat. Tento experiment by mohl být přínosný pro další vývoj v oblasti tkáňového inženýrství.

Nepřesnost ve výpočtu při tisku v praktické části práce byla nakonec prospěšná, protože se díky ní podařily zjistit nedostatky kompozitu. Kdyby se tak nestalo, nezjistilo by se, o kolik je potřeba tisknout méně vrstev, aby nanovlákná byla na povrchu vzorku.

Dalším experimentem by mohl být 3D tisk na nanovláknenné substráty. V této oblasti však dosud není zjištěný dostatek informací.

5 Závěr

V této bakalářské práci byla zkoumána realizace trojrozměrného tisku na nanovláknenné struktury a zhodnocení dokonalosti natištěných vzorů. V teoretické části bylo obecně popsáno přístrojové vybavení s důrazem na parametrické specifikace.

Návrhy šablon byly zpracovány do trojrozměrných nákrešů jednotlivých obrazců, které byly přerýsovány v počítačovém programu Pro/Engineer WildFire 4.0 kompatibilním s 3D tiskárnou. Příprava nanovláknenných struktur z biodegradabilního materiálu polykaprolaktonu byla vytvořena elektrostatickým zvlákněním na zařízení NanospiderTM.

Příprava nanovláken pro trojrozměrný tisk byla provedena na podložní sklíčka. Zvětšení adheze nanovláken ke skleněným podložkám byla uskutečněna za pomoci technické mleté želatiny. Požadované vzory zkušebních vzorků byly tisknuty z materiálu VeroClear. Příprava pro finální tisk byla provedena vybráním a zvětšením vzorů z biodegradabilního materiálu MED 610. Byly natištěny čtyři finální vzory s nanovláknennou strukturou. Po tisku byly vzory pro další zpracování vyřezány z podložních skel.

Obrazová analýza připravených vzorků byla provedena optickým mikroskopem Carl Zeiss Axio Imager M2M. Každý vzorek byl analyzován se zvětšením 25x a 50x a byly pořízeny snímky vytištěného vzoru. Vzorky byly připraveny k pozlacení 3 nm zlata, kvůli zviditelnění povrchu a analyzovány v rastrovacím elektronovém mikroskopu. UHR FE-SEM Carl Zeiss ULTRA Plus.

Mechanické testování materiálů bylo na mikroohybovém přístroji, kde byly zjišťovány mechanické vlastnosti vzorků při zatížení ohybníkem. Vzorky nebyly dostatečně tuhé, proto zkušební měření nebyla relevantní a zkouška reálná. Další analýza byla zkouška tahem. Zde se testovala pevnost kompozitního materiálu. Zkoušený materiál však nevykazoval dostatečnou pevnost v rozsahu stroje a hodnoty nebyly zaznamenány.

Z experimentu je patrné, že mechanické vlastnosti materiálu nejsou optimální, ale pro použití například v oblasti biomedicíny, jsou dostačující.

Vzorky byly následně srovnány na základě obrazové dokumentace a byly posuzovány formy natištěného materiálu, s důrazem na jasné ohraničení natištěných útvarů. Největší rozdíl byl mezi vzorky s materiálem VeroClear, MED 610 a materiálem MED 610 bez pěti počátečních vrstev.

Chybějící vrstvy narušovaly strukturu vzoru a někde se objevil i chybějící tisk. Nanovláknna se nacházela na povrchu tisknutého vzoru, což bylo kladné zjištění. Bylo zjištěno, kolik stavebních vrstev tisku je nutné odebrat. Pro biologické testování je důležité, aby použité materiály byly biodegradabilní a biokompatibilní. Dalším požadavkem jsou mechanické vlastnosti, které v tomto případě zajišťoval 3D tisk. Nanovláknenná vrstva a zvolený vzor může umožňovat dokonalou adhezi pro buňky. Použití těchto dvou technologií může být v budoucnu velice slibné pro využití právě ve tkáňovém inženýrství.

6 Použité zdroje

ABE.TEC, s., 2014. *ABE.TEC, s.r.o.*. [Online]

Available at: <http://www.optic.cz/popis-mikroskopu/>

[Přístup získán 28. Únor 2014].

Andršová Z., V. L. S. B. Š. I., 2013. Aplikace mikroohybové zkoušky na izotermicky kalené litiny. 3. Listopad, pp. 1–2.

Baumgarten, P., 1971. V: *Electrostatic spinning of acrylic microfibers*. místo neznámé: J of Colloid and Interface Science, pp. 71–79.

Bíteš, s. V., 2000–2014. *3D tisk*. [Online]

Available at: <http://www.pbsvb.cz/technologie-rapid-prototyping>

[Přístup získán 5. Leden 2014].

Bíteš, s. V., 2000–2014. *Rapid Prototyping*. [Online]

Available at: <http://www.pbsvb.cz/technologie-rapid-prototyping>

[Přístup získán 5. Leden 2014].

Drozin, V., 1955. V: *The electrical dispersion of liquids as aerosol*. místo neznámé: Journal of Colloid Science, pp. 158–164.

EDLIN, s., 2001. *EDLIN, s.r.o.*. [Online]

Available at: <http://www.edlin.cz/polaron/q150r.htm>

[Přístup získán 2. Březen 2014].

Elmarco, 2004–2013. *Nanospider*. [Online]

Available at: <http://www.elmarco.cz/produkty/produkty/>

[Přístup získán 15. Listopad 2013].

Elmarco, 2004–2013. *NS Production Lines 500*. [Online]

Available at: <http://www.elmarco.cz/produkty/ns-produkcni-linka-500/>

[Přístup získán 15. Listopad 2013].

Elmarco, 2004–2013. *Technologie zvlákňování*. [Online]

Available at: <http://www.elmarco.cz/technologie/technologie/>

[Přístup získán 26. Listopad 2013].

Elmarco, 2014. *Elmarco*. [Online]

Available at: <http://www.elmarco.cz/technologie/nanovlakna/>

[Přístup získán 25. Únor 2014].

Formhals, 1934. US, Patent č. 1,975,504.

Formhals, 1939. US, Patent č. 2,160,962.

Formhals, 1940. US, Patent č. 2,187,306.

Formhals, 1943. US, Patent č. 2,323,025.

Formhals, 1944. US, Patent č. 2,349,950.

Hermanová, S., 2013. *Chempoint*. [Online]

Available at: <http://www.chempoint.cz/polykaprolakton-biodegradabilni-polyester>
[Přístup získán 11. Březen 2014].

Jirsák, 2003. *Nanospider*. Česká republika, Patent č. 2421.

Kufner, M. P., 2012. *MUDr. Petr Kufner*. [Online]

Available at: <http://petr-kufner.blog.cz/1209/elektronovy-mikroskop>
[Přístup získán 3. Březen 2014].

KVS, 2013. *Technologie Rapid Prototyping Polyjet Matrix*. [Online]

Available at: <http://www.kvs.tul.cz/objet-connex500>
[Přístup získán 23. Listopad 2013].

Lanza, R., Langer, R., Vacanti, J. P., *Principles of Tissue Engineering*, 1. Vyd.
Academic Press, 2000, 995 s., ISBN: 0-12-436630-9.

Larrondo, M. R., 1981. Electrostatic fiber spinning from polymer melts. III.

Electrostatic deformation of a pendant drop of polymer melt.. V: místo neznámé: *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Ed.*, pp. 933–940.

Lukáš D., Sarkar A., Martinová L., Vodseňálková K., Lubasová D., Chaloupek J.,
Pokorný P., Mikeš P., Chvojka J., Komárek M., *Physical principles of electrospinning*
(*Electrospinning as a nano-scale technology of twenty-first century*), Textile Progress,
41 (2009), 59-140, ISSN 0040-5167, ISBN-13:978-0-415-55823-5.

Ma, P. X., Elisseeff, J., *Scaffolding in Tissue Engineering*, CRC Press, Taylor & Francis
Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, 2006, ISBN: 1-57444-521-9.

Objet, 2011. *Connex 500*. [Online]

Available at: http://www.objet.cz/uploads/files/C500_A4_il.pdf
[Přístup získán 10. Leden 2014].

Palsson, B., Hubbell, J. A., Plosney, R., Bronzino, J. D., *Tissue Engineering: (Principles and Applications in Engineering)*, 1. Vyd. CRC Press, 2003, 392 s. ISBN: 0-8493-1812-2.

Reneker D. H., C. I., 1996. Nanometre diameter fibres of polymers produced by electrospinning.. V: místo neznámé: *Nanotechnology*, pp. 216–223.

Růžicková, I. J., 2004. Elektrostatické zvlákňování nanovláken. V: místo neznámé: *Technická univerzita v Liberci*, p. 5.

Simons H., L., 1966. US, Patent č. 3, 280, 229.

TUL Ústav pro nanomateriály, p. t. a. i., 2013. *Mikroskopie, zobrazovací technika*.
[Online]
Available at: http://cxi.tul.cz/spoluprace-s-prumyslem/CZ_Mikroskopy.pdf
[Přístup získán 3. Březen 2014].

Vonnegut, B. N. R. L., 1952. V: *Production of monodisperse liquid particles by electrical atomization*. místo neznámé: Journal of Colloid Science , pp. 616–622.

7 Zdroje obrázků

Elmarco, *Operation manual NS Line IWS500U Series*, 2. Vyd.
Elmarco, 2012, 23 s.

Elmarco, *Operation manual NS Line IWS500U Series*, 2. Vyd.
Elmarco, 2012, 32 s.

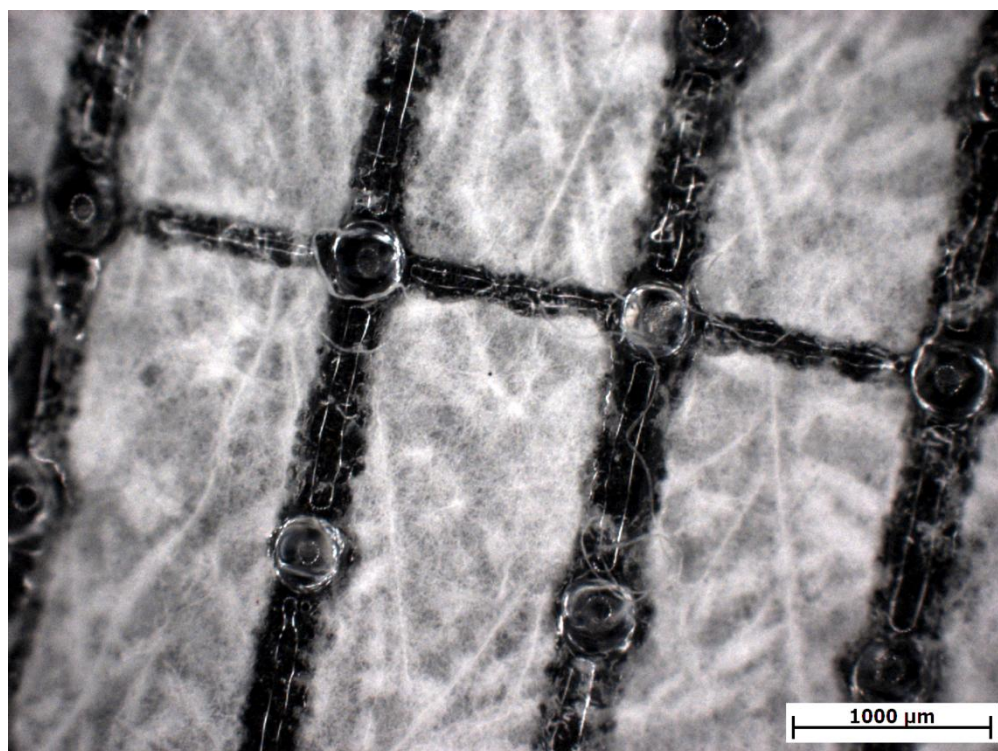
Evan J. Weaver, 2013. *Elektrostatické zvlákňování*. [Online]
Available at: <http://openwetware.org/wiki/Image:Electrospinningprocess.png>
[Přístup získán 2. Leden 2014].

Laborator elektronové mikroskopie, 2008. *Funkční schéma el. mikroskopu*. [Online]
Available at: <http://barrande.nm.cz/ukazimg.php?co=images/6/2v.gif>
[Přístup získán 25. Březen 2014].

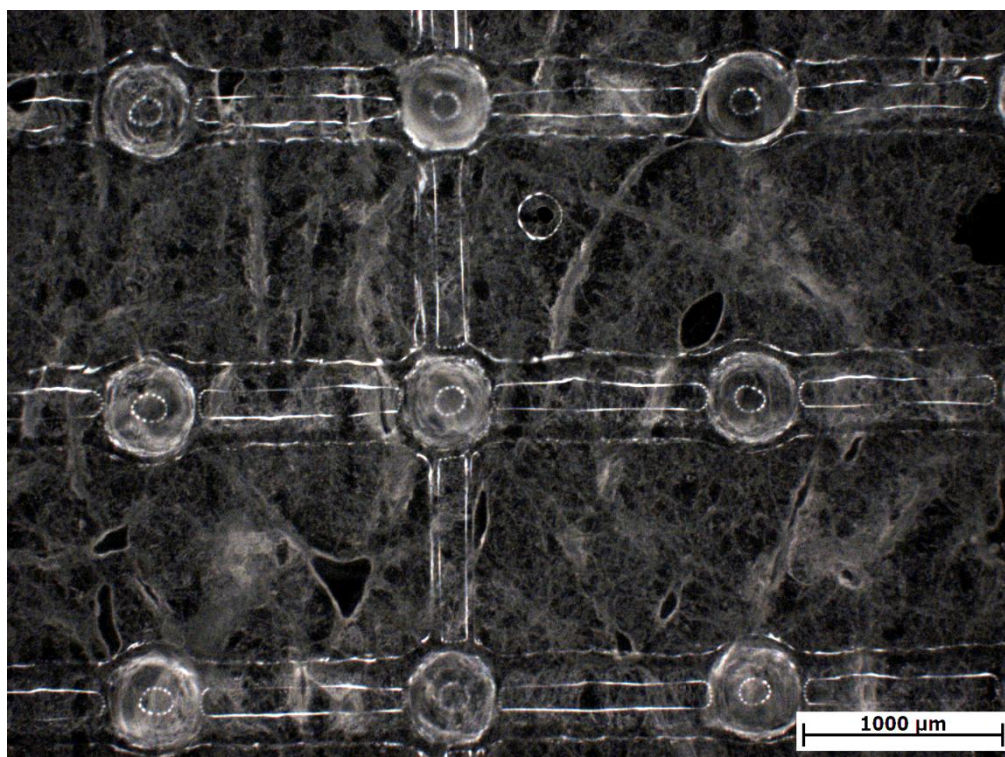
Stratasys, 2012. *Objet Connex 500*. [Online]
Available at: <http://www.objet.cz/3dtiskarny/DESIGN/objet-connex/#connex500>
[Přístup získán 5. Únor 2014].

8 Obrázková příloha

Příloha 1

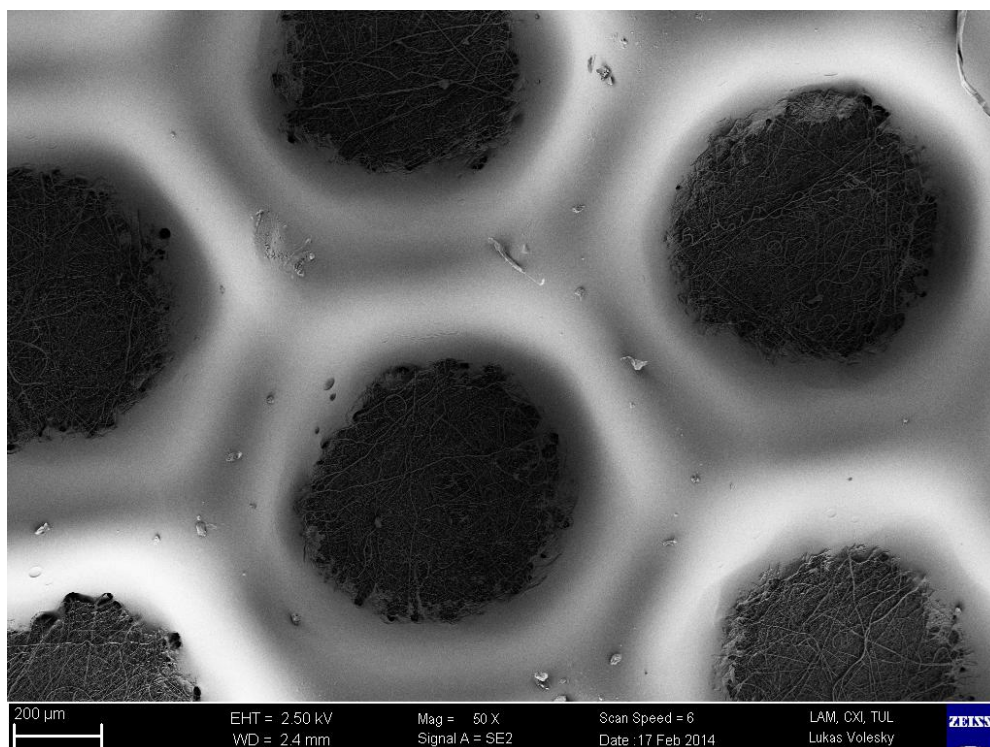


Obr. 27: Snímek vzoru T1b, zvětšení 25x. MET 610 bez 5 vrstev. Zdroj vlastní.

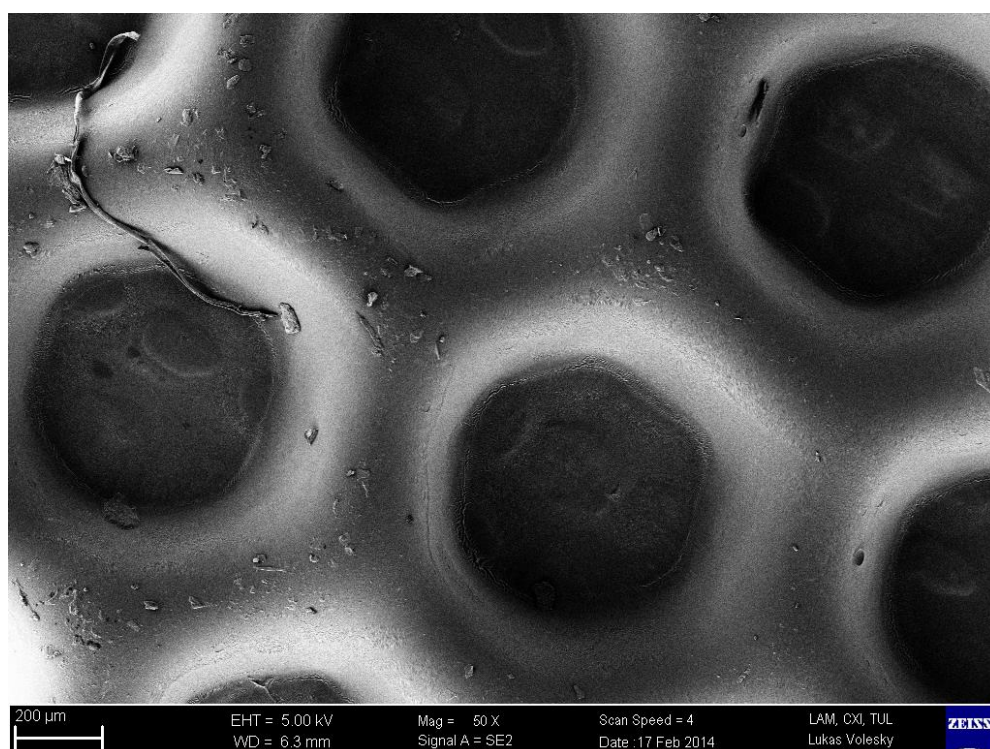


Obr. 28: Snímek vzoru T1b, Zvětšení 25x. MET 610. Zdroj vlastní.

Příloha 2



Obr. 29: Snímek vzoru T3b, zvětšení 50x. MET 610 bez 5 vrstev. (SEM) Zdroj vlastní.



Obr. 30: Snímek vzoru T3b, zvětšení 50x. MET 610. (SEM) Zdroj vlastní.